جغرافیا و مخاطرات محیطی، شماره هفدهم، بهار ۱۳۹۵

صص ٥٤-۳۷

ارزیابی خطر ریسک زمین‌لغزش حوضه آبخیز طالقان‌رود بر پایه الگوریتم بهینه‌سازی توافقی ویکور

مژگان انتظاری[1]- استادیار ژئومورفولوژی دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

فاطمه خدادادی- دانشجوی دکتری مخاطرات ژئومورفولوژی دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

اکبر رستمی - دانش‌آموخته کارشناسی ارشد ژئومورفولوژی دانشگاه شهید بهشتی تهران، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ١٣٩٤/٤/١٨   تاریخ تصویب: ١٣٩٥/١/١٧

چکیده

ناپایداری‌های دامنه‌ای، ازجمله پدیده‌های معمول در بیشتر مناطق کوهستانی ایران است. در این میان یکی از مخاطره‌آمیزترین ناپایداری‌ها، زمین‌لغزش است. هدف از این پژوهش، تهیه نقشه حساسیت پذیری در زیرحوضه‌های طالقان‌رود به زمین‌لغزش با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی توافقی ویکور است. ابتدا پس از تهیهٔ نقشهٔ پایهٔ محدودهٔ مطالعاتی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و بازدیدهای میدانی، نقشهٔ عوامل مؤثر در حساسیت پذیری حوضه به زمین‌لغزش شامل شیب، فاصله از گسل، طبقات ارتفاعی، تراکم زهکشی، کاربری اراضی، پوشش گیاهی، لیتولوژی، نوع خاک و بارش در محیط GIS تهیه شد. سپس ضریب اهمیت هرکدام از معیارهای مذکور در وقوع زمین‌لغزش، به کمک الگوریتم سلسله مراتبی AHP به دست آمد که معیارهای شیب، لیتولوژی و طبقات ارتفاعی بیشترین ضریب اهمیت را کسب کردند. سپس بر پایهٔ الگوریتم بهینه‌سازی ویکور، درجه سودمندی و پشیمانی انتخاب گزینه‌های برتر (زیرحوضه‌ها)، مشخص شد. در پایان با محاسبهٔ میزان شاخص بهینهٔ ویکور، برحسب درجهٔ حساسیت پذیری به زمین‌لغزش، زیرحوضه‌ها در ۳ کلاس کیفی حساسیت پذیری کم، متوسط و زیاد طبقه‌بندی شدند. نتایج نشان داد زیر حوضه‌های زیدشت ۱، ۲ و دونبولید از بیشترین حساسیت پذیری به وقوع زمین‌لغزش برخوردارند و حساسیت به وقوع زمین‌لغزش در زیر حوضه‌های شهرک، ناویزک و حسنجان حداقل است.

کلیدواژه‌ها: حساسیت پذیری، ناپایداری دامنه‌ها، الگوریتم بهینه‌سازی، AHP، طالقان‌رود.

۱ نویسنده مسئول ۰۹۱۳۳۳۱۳۱۹۳

Email: entezary54@yahoo.com

۱. مقدمه

مخاطرات محیطی[1] اعم از مخاطرات با منشأ اتمسفری و مخاطرات با منشـأ زمینـی، چنانچـه جوامـع انسـانی را دچار چالش‌های اقتصادی و جانی کنند، جنبهٔ بلیه[2] به خود خواهند گرفت. مخاطرات زمینی که عمـدتاً بـه‌صـورت کاتاستروفیک روی می‌دهند، می‌توانند در مقیاس کوچک اما با شدت زیاد، خسارت‌های اقتصادی و جانی به همـراه داشته باشند. حرکات دامنه‌ای، ازجمله مهم‌ترین مخاطرات زمینی در منـاطق مسـتعد وقـوع مخـاطرات محیطـی بـه شمار می‌روند. زمین‌لغزش که یکـی از مهـم‌تـرین حرکـات دامنـه‌ای اسـت و همـواره در سراسـر جهـان موجـب مرگ‌ومیر سالانه هزاران نفر و خسارت‌های سنگین مالی و اقتصادی به مناطق مسکونی می‌شود، از دسته مخـاطرات زمینی با فراوانی وقوع بالا در ایران است و آثار آن در بسیاری از دامنه‌های نیم خشـک تـا مرطـوب مسـتعد کشـور دیده می‌شود.

لغزش عبارت است از پایین افتادن یا حرکت یکپارچه و اغلب سریع حجمی از مواد رسوبی در امتداد دامنه‌ها. زمین‌لغزش ازجمله مخاطرات طبیعی است که همه‌ساله خسارت‌های جانی و مالی فراوانی را در مناطق کوهستانی، پرباران و لرزه‌خیز به همراه دارد. ازآنجاکه پیش‌بینی زمان رخداد زمین‌لغزش‌ها از توان علم و دانش فعلی بشر خارج می‌باشد، لذا با شناسایی مناطق حساس به زمین‌لغزش و رتبه‌بندی کردن آن می‌توان تا حدودی از خطر ناشی از بروز زمین‌لغزش جلوگیری نمود.

تاکنون روش‌های مختلفی برای پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش و برآورد شدت و ارزیابی این پدیده ارائـه شـده کـه به‌طورکلی در روش‌های کیفی، نیمه کمّی و کمّی دسته‌بندی می‌شوند. روش‌هـای مبتنـی بـر همبسـتگی متغیرهـای مؤثر در زمین‌لغزش، مانند رگرسیون دو متغیره، چند متغیره و لجستیک، ازجمله روش‌های کمّـی پهنـه‌بنـدی خطـر زمین‌لغزش شمرده می‌شوند (لیوجونز، ۲۰۰٤: ۱۵۰).

در ارتباط با کاربرد روش‌های مذکور، در پژوهش‌های انجام یافته در سایر کشورها طی سال‌های اخیر، مـی‌تـوان به کارهای پلیکـانی و همکـاران (۲۰۱۳: ٤)، معتمـدی و لیانـگ (۲۰۱۳: ۳۹۹)، کـاوزوگلو و همکـاران (۲۰۱۳: ۷)، فلاچیزمو و همکاران (۲۰۱۳: ۱۸۰)، آکون[3] (۲۰۱۲: ۱۰۵)، داوالیلو[4] و همکاران (۲۰۱۲: ۳۷۹)، رگمـی[5] و همکـاران (۲۰۱۲: ۲)، دیاپ[6] و همکاران (۲۰۱۰: ۲۹۰) اشاره داشت.

کامک و همکاران (۲۰۰٦: ۲۵) با استفاده از تجزیهٔ آماری چند متغیره در مرکز اسلوونی، نشان دادنـد کـه شـیب، سنگ‌شناسی و نوع پوشش، نقش مهمی در حساسیت زمین‌لغزش ایفا می‌کنند.

---

1 Environmental Hazards
2 Disaster
3 Akgun
4 Davalillo
5 Regmi
6 Diop

آیالو[1] و یاماگیشی[2] (۲۰۰۵: ٤٤٠) با استفاده از روش رگرسیون لجستیک و سامانهٔ اطلاعات جغرافیایی، نقشهٔ حساسیت به زمین‌لغزش را در کوه‌های کاکودا- یاهیکو در مرکز ژاپن تهیه کردند و اظهار داشتند که شبکه‌های جاده، نقش اساسی در تعیین و توزیع زمین‌لغزش‌ها ایفا می‌کنند.

در ایران نیز مطالعات متنوعی صورت گرفته، که به چند پژوهش انجام یافته در سال‌های اخیر اشاره می‌شود.

فتوحی و کیایی (۱۳۹۳: ۱۱۷) در بررسی مدیریت بحران و ارزیابی ریسک شهر قاین بر اساس مدیریت ریسک به این نتیجه رسیدند که ٤٧/٤٤ درصد از محدوده مورد مطالعه دارای وضعیت با ریسک کم و ٢٦/١٤ درصد دارای وضعیت با ریسک متوسط و ٢٦/٤ درصد در شرایط با ریسک بالا قرار دارد.

سپهر و همکاران (۱۳۹۲: ۳۵)، پژوهشی با عنوان تهیه نقشه حساسیت پذیری زمین لغزش دامنه‌های شمالی بینالود بر پایه الگوریتم بهینه‌سازی توافقی ویکور انجام دادند و در آن خطر ریسک در زیر حوضه‌های مختلف را تعیین نموده‌اند.

خالدی و همکاران (۱۳۹۱: ٦٥)، عامل‌های مؤثر در رویداد زمین لغزش و پهنه‌بندی آن با استفاده از مدل رگرسیون لجستیک در محیط GIS را با مطالعه موردی حوضه آبخیز طالقان انجام دادند و نتیجه گرفتند که متغیر فاصله از گسل مهم‌ترین عامل مؤثر در رویداد زمین لغزش حوضه است.

زارع و همکاران (۱۳۹۰: ۲۰) در مطالعهٔ پهنه‌بندی و ارزیابی خطر زمین‌لغزش با استفاده از مدل‌های اطمینان، ارزش اطلاعات و تحلیل سلسله مراتبی در حوضهٔ آبخیز واز، به این نتیجه رسیدند که ۵۳/٣٤ درصد حوضه درکلاس خطر زیاد و ۲۰/۲۸ درصد درکلاس خطر خیلی زیاد قرار دارد که این امر نشان دهندهٔ خطر پذیری بالای حوضه در برابر زمین‌لغزش است.

موسوی خطیر و همکاران (۱۳۸۹: ۱۰۵)، نقشهٔ حساسیت به وقوع زمین‌لغزش در حوضهٔ آبخیز سجارود را با استفاده از رگرسیون لجستیک تهیه کردند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که ۵۳ درصد از مساحت حوضه در منطقه با خطر بسیار کم، ۳/۱۸ درصد در منطقهٔ کم خطر، ۲۱ درصد در منطقه با خطر متوسط و ۷/۷ درصد مساحت حوضه در منطقهٔ پر خطر قرار گرفته است.

محمدی و همکاران (۱۳۸۸: ۳۰) به اولویت‌بندی عوامل مؤثر بر زمین‌لغزش و تهیهٔ نقشهٔ خطر آن با استفاده از مدل‌های ارزش اطلاعات و فرایند تحلیل سلسله مراتبی در بخشی از حوضهٔ آبخیز هراز پرداختند. نتایج نشان داد که سازندهای شمشک و پادگانه‌های آبرفتی، فاصلهٔ ۵۰۰ متری از جاده و ٤۰۰ متری از آبراهه، سوی شیب باختری، شیب ۱۵ تا ۵۰ درصد، ارتفاع ۱۰۵۵ تا ۲۱۰۰ متری و کاربری مسکونی و باغ کشاورزی، بیشترین حساسیت را نسبت به زمین‌لغزش دارند.

1 Ayalew
2 Yamagishi

بیاتی خطیبی (۱۳۸٦: ۵۳) در پژوهشی به تعیین حساسیت بالقوهٔ سطوح شیب دار به وقوع زمین‌لغزش در حوضهٔ قرنقوچای، واقع در دامنهٔ شرقی کوهستان سهند با استفاده از روش تعیین عامل ویژه پرداخت. نتایج وی نشان داد که محدودهٔ خاکسترهای آتشفشانی و مارن‌ها که لغزش‌های بزرگ قدیمی نیز در گذشته روی آن‌ها رخ داده، مساعدترین بستر را برای وقوع لغزش‌ها فراهم می‌کنند. همچنین در بخش‌هایی از حوضهٔ مطالعاتی، کشت آبی همراه با آشفتگی شدید دامنه‌ها، به عمده‌ترین عامل تحریک کنندهٔ دامنه‌ها نسبت به وقوع لغزش‌ها تبدیل شده است.

بسیاری از پژوهش‌های انجام گرفته در ایران، به‌طور عمده روی روش‌های رتبه‌ای تصمیم‌گیری مانند AHP و روش‌های رتبه‌ای رگرسیون خطی متمرکز شده است که به برخی از کارهای انجام گرفته در سال‌های اخیر اشاره شد. اگرچه در ارتباط با استفاده از روش‌های نارتبه‌ای در مطالعهٔ مخاطرات طبیعی، پژوهش‌های اندکی انجام گرفته است، اما در ارتباط با کاربرد روش‌های بهینه‌سازی توافقی و روش‌های نارتبه‌ای در بحث زمین‌لغزش در ایران و جهان، مطالعات اندکی صورت گرفته است.

بررسی مطالعات گذشته نشان می‌دهد که عمده مطالعات انجام شده در زمینه پهنه‌بندی خطر لغزش، انجام گرفته و توجه کمتری به پهنه‌بندی ریسک لغزش شده است. در این پژوهش با استفاده از یکی از روش‌های نارتبه ای با عنوان روش بهینه‌سازی توافقی ویکور[1] (VIKOR) که بر پایه محاسبه حداکثر سودمندی و حداقل پشیمانی است، نقشهٔ حساسیت پذیری زیر حوضه‌های مورد مطالعه نسبت به وقوع پدیدهٔ زمین‌لغزش تهیه گردیده است. طبقه‌بندی حوضه برحسب استعداد و حساسیت پذیری زمین‌لغزش با استفاده از روش بهینه‌سازی ویکور، جزء موارد نخستین است که در مطالعات مربوط به زمین‌لغزش دنبال می‌شود و نوآوری این پژوهش به شمار می‌رود.

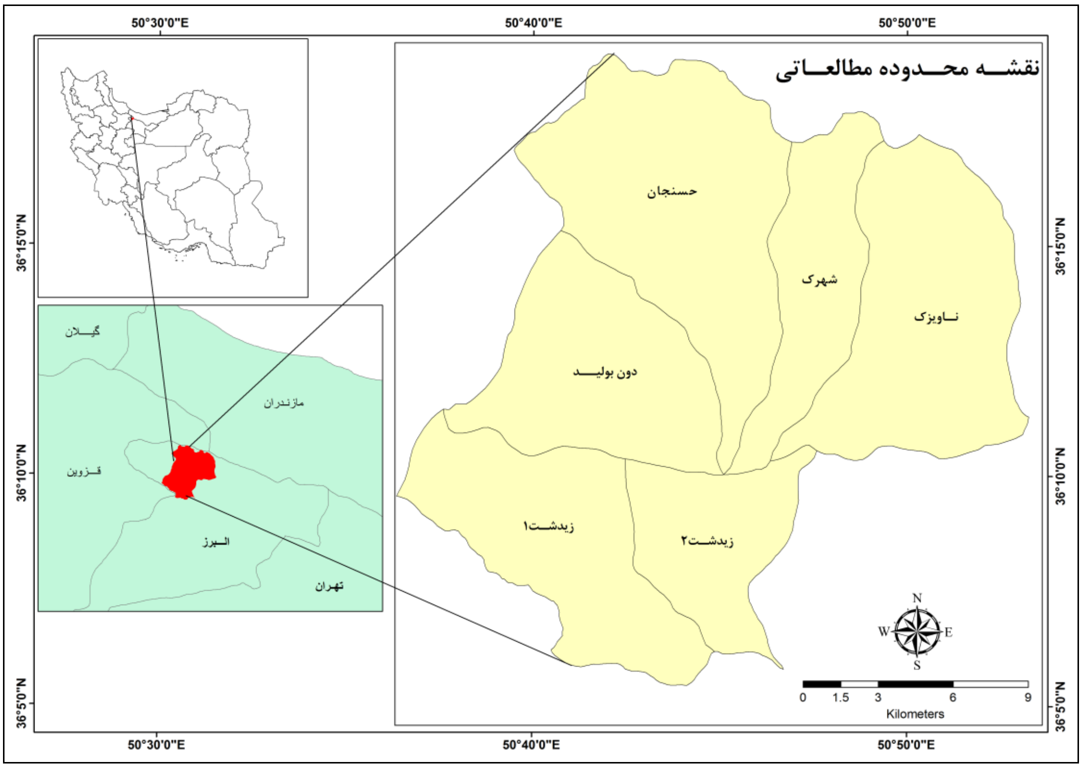
روش ویکور یکی از روش‌های حل مسئلهٔ چند معیاره است؛ در مسائلی با معیارهای نامتناسب و ناسازگار، به‌طوری‌که تصمیم‌گیرنده نیاز به راه‌حلی نزدیک به راه‌حل ایده آل دارد و تمام گزینه‌ها مطابق با معیارها مورد ارزیابی قرارگیرد، همچنین در شرایطی که فرد تصمیم‌گیرنده قادر به شناسایی و بیان برتری‌های یک مسئله در زمان شروع و طراحی آن نیست، این روش می‌تواند ابزار مؤثری برای تصمیم‌گیری باشد.

۲. منطقه مورد مطالعه

حوضه آبخیز طالقان که یکی از زیر حوضه‌های مهم حوضه آبخیز سفیدرود به شمار می‌رود و در دامنه جنوبی رشته‌کوه‌های البرز و در فاصله ۱۰۰ کیلومتری شمال‌شرق شهرستان قزوین و در بخش شمال‌غربی در فاصله ۱۲۰ کیلومتری از تهران واقع شده است. این حوضه بین دو عرض ۳٦ درجه و ۵ دقیقه تا ۳٦ درجه ۱۹

1 Visekriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje (in Serbian) = Multi criteria optimization and compromise solution (in English)

دقیقه شمالی و بین دو طول جغرافیایی ۵۰ درجه، ٣٦ دقیقه تا ۵۰ درجه ٥٤ دقیقه شرقی واقع شده است (شکل ۱). وسعت محدوده مورد مطالعه ٣٧٤/٩٢ کیلومترمربع می‌شود. ارتفاع متوسط حوضه ۲۳۰۷ متر از سطح دریا (ارتفاع حداکثر ۳۹۹۳ و حداقل ١٦٩٣ متر) است. رودخانه طالقان در مرکز این حوضه از گردنه عسلک در غرب کندوان سرچشمه می‌گیرد و به سمت غرب در جریان است این رودخانه پس از دریافت شاخه‌ای پرآبی مانند رودهای علی‌زان – مهران خجیره حسنجون و اورازان و... طی چندین کیلومتر به رودخانه الموت می-پیوندد و پس‌ازآن با نام رودخانه شاهرود به دریاچه سد سفیدرود می‌ریزد. میانگین بارش سالانه حوضه آبخیز طالقان ٦٦٠/٤١ میلی‌متر و دمای سالانه آن نیز ۱۰/۵ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. لذا براساس طبقه‌بندی دومارتن آب‌وهوای حوضه طالقان در گروه نیمه‌مرطوب قرار می‌گیرد.

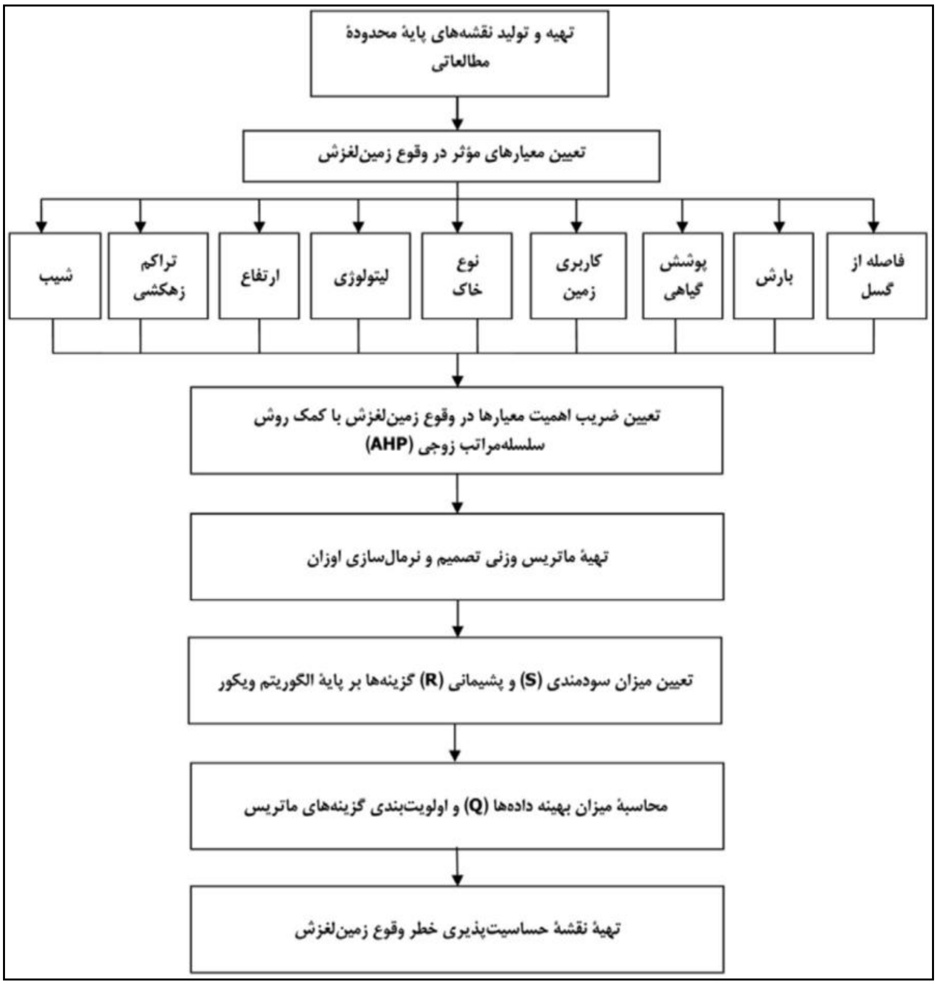


شکل ۱ موقعیت جغرافیایی حوضه آبخیز طالقان‌رود

۳. مواد و روش‌ها

به‌منظور تهیهٔ نقشهٔ حساسیت پذیری زمین‌لغزش در حوضه‌های آبخیز طالقان رود، پس از تهیهٔ اطلاعات اولیه، مانند توپوگرافی (۱:۵۰۰۰۰)، زمین‌شناسی (۱:۱۰۰۰۰۰)، عکس‌های هوایی و تصاویر ماهواره‌ای موجود، نقشه‌های پایه در محدودهٔ مطالعاتی، شامل نقشهٔ شیب، خاکشناسی و ژئومرفولوژی تهیه شد. پس از تهیهٔ اطلاعات و نقشه‌های پایه، پژوهش در دو مرحله انجام یافت. مرحلهٔ نخست را تعیین معیارهای اصلی مؤثر در

استعداد مناطق به وقوع زمین‌لغزش و تهیهٔ نقشه‌های معیارهای انتخابی مذکور تشکیل داده است. مرحلهٔ دوم، تعیین ضریب اهمیت معیارها و پیاده‌سازی الگوریتم ویکور برای رسیدن به نقشهٔ حساسیت پذیری زمین‌لغزش و طبقه‌بندی حوضه‌ها برحسب درجهٔ حساسیت است. شکل ۲ مراحل روش کار پژوهش حاضر را نشان می‌دهد.

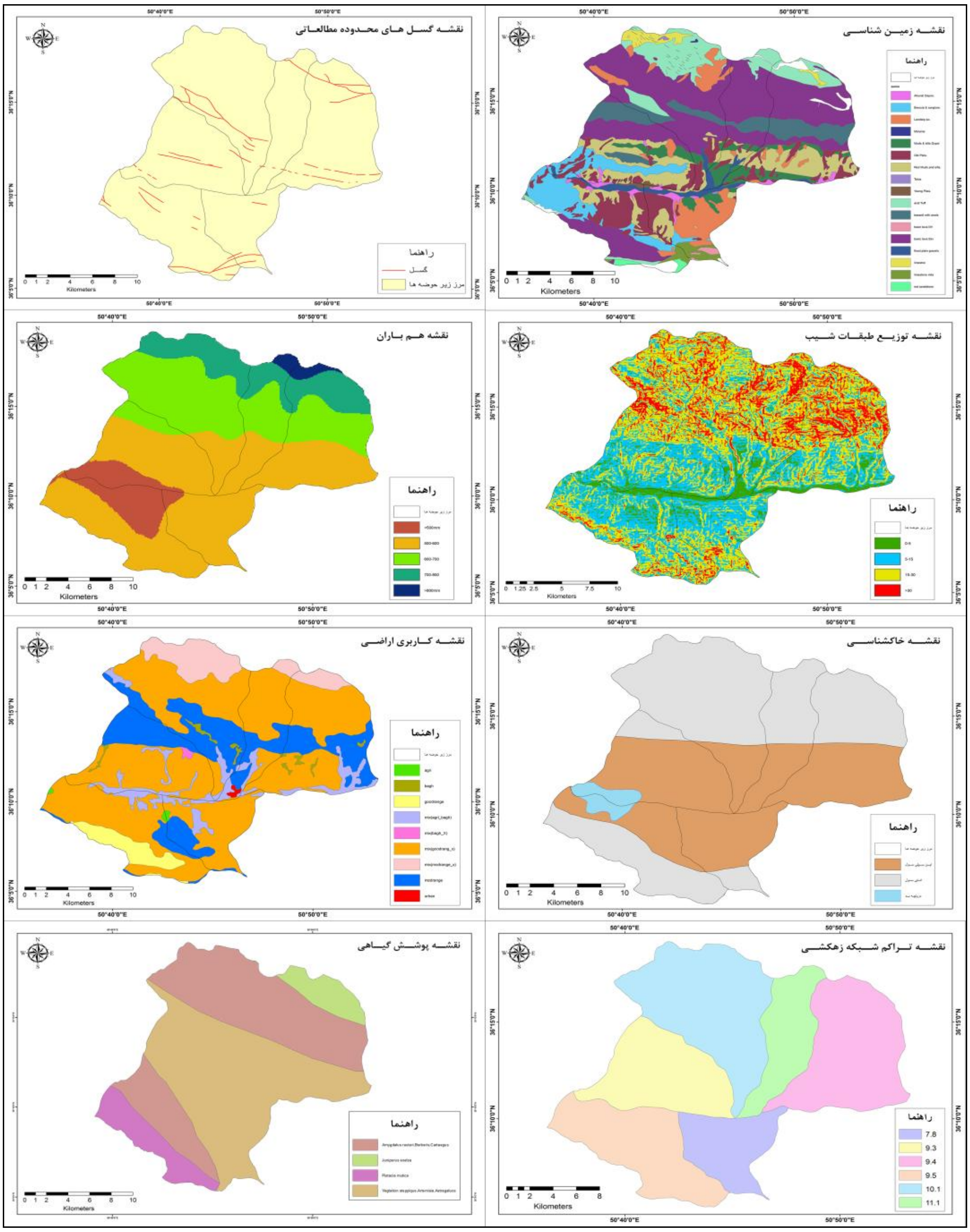


شکل ۲ نمودار روش مطالعاتی انجام گرفته برای رسیدن به نقشهٔ حساسیت پذیری زمین‌لغزش

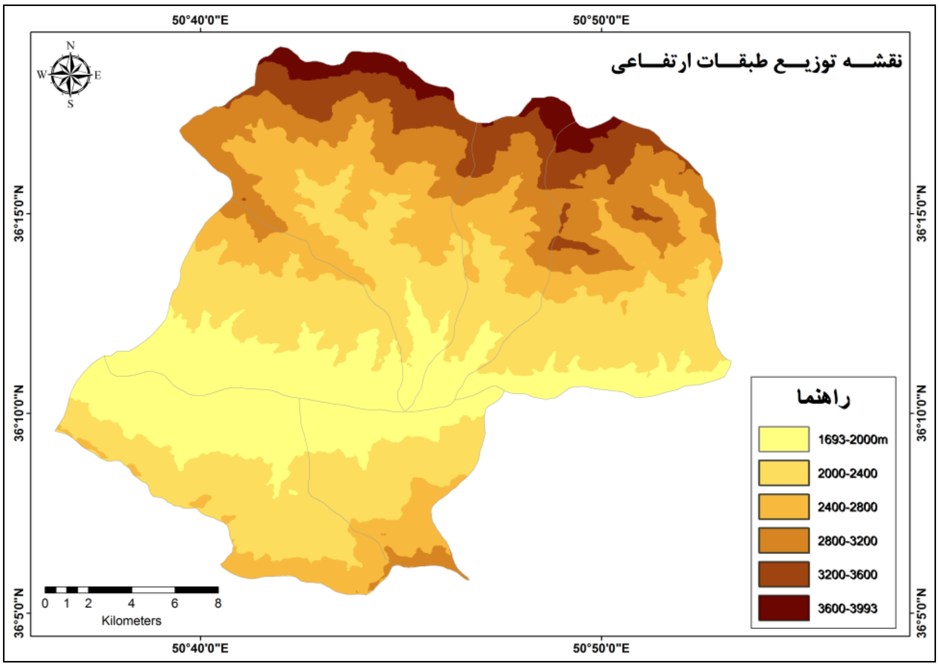
٤. بحث و نتایج

ابتدا با توجه به شرایط منطقه و نظرات کارشناسی طی چندین مرحله، نُه معیار اصلی در ارتباط بااستعداد حوضه به زمین‌لغزش و نیز، مؤثر در وقوع پدیدهٔ مذکور در زیر حوضه‌های مطالعاتی در نظر گرفته شد. پس از انتخاب معیارهای اصلی، در مرحلهٔ بعد نقشه‌های مربوط به هرکدام از معیارهای انتخابی برای وزن دهی و ارزیابی زیرحوضه‌ها در محیط GIS تهیه و ترسیم شد. شکل ۳، نقشهٔ کیفی نُه معیار انتخابی مؤثر در وقوع زمین‌لغزش را در منطقهٔ مطالعاتی نشان می‌دهد.

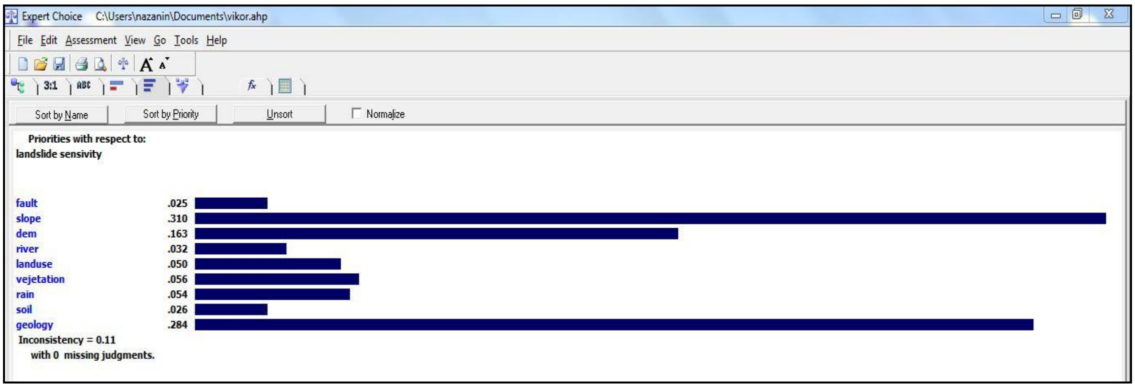
با توجه به اثر ۹ معیار فوق در وقوع زمین‌لغزش، معیارهـای میـزان پوشـش گیـاهی و فاصـله از گسـل، دارای اثـر کاهشی و هفت معیار دیگر اثر افزایشی دارند. پس از تهیهٔ نقشهٔ معیارهای انتخابی، ضریب اهمیت معیارهـای مـذکور از دیدگاه درجه اهمیت در وقوع زمین‌لغزش و حساسیت پذیری حوضه‌ها به این پدیده، بـه کمـک الگـوریتم سلسـله مراتبی AHP تعیین شد (شکل ٤). در جدول ۱، درجه اهمیت معیارهای انتخابی نشان داده شده است.



شکل ۳ نقشهٔ کیفی نُه معیار در نظرگرفته شده در استعداد و وقوع زمین‌لغزش حوضهٔ طالقان رود



ادامه شکل ۳ نقشهٔ کیفی نُه معیار در نظرگرفته شده در استعداد و وقوع زمین‌لغزش حوضهٔ طالقان رود



شکل ٤ تعیین ضریب اهمیت معیارهای مؤثر در وقوع زمین‌لغزش با استفاده از نرم‌افزار Expert choice

جدول ۱ ضریب اهمیت معیارهای مؤثر در وقوع زمین‌لغزش در حوضهٔ مطالعاتی با کمک روش AHP

معیار	فاصله از گسل	شیب	طبقات ارتفاعی	تراکم زهکشی	کاربری اراضی	پوشش گیاهی	بارش	نوع خاک	لیتولوژی
ضریب اهمیت	۰/۰۲۵	۰/۳۱۰	۰/۱۶۳	۰/۰۳۲	۰/۰۵	۰/۰۵٦	۰/۰٥٤	۰/۰۲٦	۰/۲۸٤

مزیت مدل ویکور این است که ارزیابی همه معیارها به بررسی کارشناسی نیاز ندارد بلکه می‌توان از داده‌های خام استفاده می‌کرد. برای مثال در مورد پارامترهای شیب، طبقات ارتفاعی، تراکم زهکشی و بارش

از متوسط مقادیر شیب، ارتفاع متوسط، تراکم زهکشی و بارش زیر حوضه، استفاده کرده و عیناً خود مقادیر متوسط را در ماتریس وارد کرد. البته معیارهای فاصله از گسل، کاربری و پوشش گیاهی، نوع خاک و لیتولوژی چون داده خام نداشتند از ۱ تا ۱۰ ارزیابی شدند.

در این پژوهش، به‌منظور وزن دهی گزینه‌ها بر اساس نقش هر معیار در گزینهٔ مورد نظر، از بازهٔ وزن‌دهی قطعی یک تا ده استفاده شده است؛ به‌گونه‌ای که وزن ۱ کمترین تأثیر و ۱۰ بالاترین تأثیر را در خطر زمین‌لغزش نشان می‌دهد.

پس از تعیین ضریب اهمیت معیارها، ماتریس تصمیم اوزان برای انجام الگوریتم ویکور، براساس رابطهٔ ۱ تهیه شد. همان‌طور که مشخص است، نُه معیار در ارزیابی شش گزینه نقش دارند که معرف حوضه‌های آبریز هستند. جدول ۲ تشکیل ماتریس تصمیم‌گیری بر اساس پارامترهای مؤثر در زیر حوضه‌ها را نشان می‌دهد.

رابطه۱:

$$D = \begin{array}{c} \\ A_1 \\ \vdots \\ A_6 \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{ccc} C_1 & \cdots & C_9 \end{array} \\ \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{m1} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix} \end{array}$$

جدول ۲ ماتریس تصمیم‌گیری براساس معیارهای مؤثر در وقوع زمین‌لغزش

منطقه / معیار	فاصله از گسل	شیب	طبقات ارتفاعی	تراکم زهکشی	کاربری اراضی	پوشش گیاهی	بارش	نوع خاک	لیتولوژی
حسنجان	۷	۲۲	۲۷۵۰	۱۰/۰۳	٤	٥	٦٥٦	٤	٤
شهرک	۳	۲۱	۲٦٤٥	۱۱/۱۰	٦	۷	٦٥٤	٤	٥
ناویزک	۸	۱۹	۲٥٦٦	۹/٤٤	۳	٤	٦۳٥	٥	٦
دونبولید	٥	١٤	۲۰۸۷	۹/۳۳	۷	٦	٥٤۱	۷	۸
زیدشت۱	۹	١٤	۲۱۱۰	۹/٥۷	۲	۳	٥۰۹	٥	٦
زیدشت۲	٦	۱۳	۲۱۸۷	۷/۸۰	٤	٥	٥٤۱	٦	۷

پس از انجام وزن دهی و تهیهٔ ماتریس وزنی، مقادیر ماتریس با استفاده از رابطهٔ ۲ نرمال شدند. جدول ۲، مقادیر نرمال شده یا به گفته‌ای ماتریس وزنی نرمال شده را نشان می‌دهد.

رابطه۲:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{m} x_{ij}^{2}}}$$

جدول۳ مقادیر نرمال شدهٔ اوزان گزینه‌ها (زیرحوضه‌ها) براساس معیارهای مؤثر در وقوع زمین‌لغزش

معیار / منطقه	فاصله از گسل	شیب	طبقات ارتفاعی	تراکم زهکشی	کاربری اراضی	پوشش گیاهی	بارش	نوع خاک	لیتولوژی
حسنجان	۰/۴۳	۰/۵۱	۰/۴۶	۰/۴۲	۰/۳۵	۰/۳۹	۰/۴۵	۰/۳۰	۰/۲۷
شهرک	۰/۱۸	۰/۴۸	۰/۴۴	۰/۴۷	۰/۵۲	۰/۵۵	۰/۴۶	۰/۳۰	۰/۳۳
ناویزک	۰/۴۹	۰/۴۴	۰/۴۳	۰/۴۰	۰/۲۶	۰/۳۱	۰/۴۳	۰/۳۸	۰/۴۰
دونبولید	۰/۳۰	۰/۳۲	۰/۳۵	۰/۳۹	۰/۶۱	۰/۴۷	۰/۳۷	۰/۵۴	۰/۵۳
زیدشت۱	۰/۵۵	۰/۳۲	۰/۳۶	۰/۴۱	۰/۱۷	۰/۲۳	۰/۳۵	۰/۳۸	۰/۴۰
زیدشت۲	۰/۳۶	۰/۳۰	۰/۳۷	۰/۳۳	۰/۳۵	۰/۳۹	۰/۳۷	۰/۴۶	۰/۴۶

بعد از نرمال‌سازی و تهیهٔ ماتریس نرمال وزنی (جدول ۳)، برای به دست آوردن مقادیر سودمندی و پشیمانی بر اساس الگوریتم بهینه‌سازی ویکور، مراحل زیر روی ماتریس وزنی نرمال انجام گرفت.

وزن‌دار کردن ماتریس نرمال

جهت وزن‌دار کردن، مقادیر ماتریس نرمال هر یک از گزینه‌ها بر وزن معیارها (که قبلاً از روش‌های دیگر به دست آمده بود) ضرب می‌گردد (جدول ٤).

جدول ٤ وزن‌دار کردن مقادیر نرمال شدهٔ اوزان گزینه‌ها براساس معیارهای مؤثر در وقوع زمین‌لغزش

معیار / منطقه	فاصله از گسل	شیب	طبقات ارتفاعی	تراکم زهکشی	کاربری اراضی	پوشش گیاهی	بارش	نوع خاک	لیتولوژی
ضریب AHP	۰/۰۲۵	۰/۳۱۰	۰/۱۶۳	۰/۰۳۲	۰/۰۵	۰/۰۵۶	۰/۰۵٤	۰/۰۲٦	۰/۲۸٤
حسنجان	۰/۰۱۱	۰/۱۵۸	۰/۰۷۵	۰/۰۱۳	۰/۰۱۷	۰/۰۲۲	۰/۰۲٤	۰/۰۰۸	۰/۰۷۷
شهرک	۰/۰۰۵	۰/۱٤۹	۰/۰۷۲	۰/۰۱۵	۰/۰۲٦	۰/۰۳۱	۰/۰۲۵	۰/۰۰۸	۰/۰۹٤
ناویزک	۰/۰۱۳	۰/۱۳٦	۰/۰۷۰	۰/۰۱۳	۰/۰۱۳	۰/۰۱۷	۰/۰۲۳	۰/۰۱۰	۰/۱۱٤
دونبولید	۰/۰۰۸	۰/۰۹۹	۰/۰۵۷	۰/۰۱۲	۰/۰۳۱	۰/۰۲٦	۰/۰۲۰	۰/۰۱٤	۰/۱۵۱
زیدشت۱	۰/۰۱٤	۰/۰۹۹	۰/۰۵۹	۰/۰۱۳.	۰/۰۰۹	۰/۰۱۳	۰/۰۱۹	۰/۰۱۰	۰/۱۱٦
زیدشت۲	۰/۰۰۹	۰/۰۹۳	۰/۰٦۰	۰/۰۱۱	۰/۰۱۸	۰/۰۵۱	۰/۰۲۰	۰/۰۱۲	۰/۱۳۱

تعیین مقادیر بالاترین و پایین‌ترین ارزش ماتریس نرمال وزنی

بزرگ‌ترین و کوچک‌ترین عدد هر ستون تعیین می‌گردد.

در اینجا منظور از بزرگ‌ترین عدد، یعنی عددی که بیشترین ارزش مثبت را داراست و کوچک‌ترین، یعنی بیشترین ارزش منفی. پس اگر معیار ما از نوع منفی باشد، بزرگ‌ترین عدد برعکس می‌شود یعنی می‌شود کمترین مقدار و کوچک‌ترین می‌شود بیشترین مقدار و بالعکس.

رابطه ۳:

$$f_i^* = \max_j f_{ij}; \quad f_i^- = \min_j f_{ij}$$

جدول ۵ بیشترین و کمترین مقادیر نرمال شدهٔ هر یک از معیارها

فاصله از گسل	شیب	طبقات ارتفاعی	تراکم زهکشی	کاربری اراضی	پوشش گیاهی	بارش	نوع خاک	لیتولوژی	معیار
۰/۰۱۴	۰/۱۵۸	۰/۰۷۵	۰/۰۱۵	۰/۰۳۱	۰/۰۵۱	۰/۰۲۵	۰/۰۱۴	۰/۱۵۱	fj^*
۰/۰۰۵	۰/۰۹۳	۰/۰۵۷	۰/۰۱۱	۰/۰۰۹	۰/۰۱۳	۰/۰۱۹	۰/۰۰۸	۰/۰۷۷	fi^-
۰/۰۰۹	۰/۰۶۵	۰/۰۱۸	۰/۰۰۴	۰/۰۲۲	۰/۰۳۸	۰/۰۰۶	۰/۰۰۶	۰/۰۷۴	$fj^* - fi^-$

محاسبهٔ مقدار سودمندی و تأسف معیارها

در این مرحله با توجه به مقادیر مثبت و منفی محاسبه شده در مرحلهٔ قبل، فاصلهٔ هر گزینه از راه حل ایده‌آل و سپس حاصل جمع آن‌ها برای ارزش نهایی براساس رابطه ٤ محاسبه شد. به بیانی در این مرحله سودمندی[1] و پشیمانی[2] حاصل از انتخاب یک گزینه، به منزلهٔ رتبهٔ برتر محاسبه می‌شود. مقادیر حداقل برای هر دو مقدار معرف کمترین فاصله از راه حل ایده آل (گزینه برتر) است که کمترین پشیمانی و بیشترین سودمندی را به همراه دارد.

رابطه٤:

$$S_j = \sum_{i=1}^{n} w_i \cdot \frac{f_i^* - f_{ij}}{f_i^* - f_i^-}; \qquad R_j = \max_i \left[w_i \cdot \frac{f_i^* - f_{ij}}{f_i^* - f_i^-} \right]$$

f^* = بزرگ‌ترین عدد ماتریس نرمال وزنی برای هر ستون

fij= عدد گزینه مورد نظر برای هر معیار در ماتریس نرمال وزنی

f^- = کوچک‌ترین عدد ماتریس نرمال زونی برای هر ستون

W = ضریب AHP

طبیعتاً برای گزینه به ازای هر معیار یک شاخص مطلوبیت به دست می‌آید که مجموع آن‌ها شاخص نهایی Sj گزینه را مشخص می‌کند. بزرگ‌ترین Sj هر گزینه به ازای هر معیار، شاخص نارضایتی (Rj) آن گزینه می‌باشد. برترین و بدترین رتبه براساس ارزش Sj و Rj به دست می‌آید. (جدول شماره ٦)

1 Utility measure
2 Regret measure

جدول ٦ شاخص مطلوبیت (Sj) و شاخص نارضایتی (Rj)

معیار / منطقه	فاصله از گسل	شیب	طبقات ارتفاعی	تراکم زهکشی	کاربری اراضی	پوشش گیاهی	بارش	نوع خاک	لیتولوژی	Sj	Rj
حسنجان	۰/۰۰۸	۰	۰	۰/۰۱٦	۰/۰۳۲	۰/۰٤۳	۰/۰۰۹	۰/۰۲٦	۰/284	۰/418	۰/284
شهرک	۰/۰۲۵	۰/۰٤۳	۰/۰۲۷	۰	۰/۰۱۱	۰/۰۲۹	۰	۰/۰۲٦	۰/218	۰/379	۰/218
ناویزک	۰/۰۰۳	۰/۱۰۵	۰/۰٤۵	۰/۰۱٦	۰/۰٤۱	۰/۰۱۷	۰/۰۱۸	۰/۰۱۷	۰/۱۱٤	۰/376	۰/114
دونبولید	۰/۰۱۷	۰/۲۸۱	۰/۱٦۳	۰/۰۲٤	۰	۰/۰۵۰	۰/۰٤۵	۰	۰	۰/580	۰/281
زیدشت۱	۰	۰/۲۸۱	۰/۱٤۵	۰/۰۱٦.	۰/۰۵	۰/۰۵٦	۰/۰۵٤	۰/۰۱۷	۰/۱۱٦	۰/735	۰/281
زیدشت۲	۰/۰۱۷	۰/۳۱۰	۰/۱۳٦	۰/۰۳۲	۰/۰۲۹	۰	۰/۰٤۵	۰/۰۰۸	۰/۱۳٤	۰/711	۰/310

محاسبۀ شاخص ویکور (Q) و رتبه‌بندی نهایی گزینه‌ها

درنهایت پس از محاسبۀ مقادیر سودمندی و پشیمانی شاخص ویکور (Q) برای هر گزینـه (زیرحوضـۀ مطالعاتی) به‌صورت مجزا و براساس رابطۀ ۵ محاسبه شد (جدول٦).

رابطه۵:

$$Q_j = v \cdot \frac{S_j - S^-}{S^* - S^-} + (1-v) \cdot \frac{R_j - R^-}{R^* - R^-}$$

V = عدد ثابت ۰/۵

Sj = مجموع مقدار S برای هر گزینه

S^- = بزرگ‌ترین عدد شاخص S برای هر گزینه

S^* = کوچک‌ترین عدد شاخص S برای هر گزینه

Rj = مقدار R برای هر گزینه

R^- = بزرگ‌ترین عدد شاخص R برای هر گزینه

R^* = کوچک‌ترین عدد شاخص R برای هر گزینه

جدول ٦ مقادیر شاخص ویکور در زیر حوضه‌های منطقه مطالعاتی طالقان رود

زیر حوضه	Q	زیر حوضه	Q
حسنجان	۰/۵۰۷	دونبولید	۰/۲۸۹
شهرک	۰/۷۳۱	زیدشت۱	۰/۰۷٤
ناویزک	1	زیدشت۲	۰/۰۳۳

در این مرحله بر اساس مقادیر Q محاسبه شده در گام قبل، گزینه‌ها رتبه‌بندی و تصمیم بهینه در ارتباط با انتخاب گزینه برتر (حساسیت پذیری بالاتر به زمین‌لغزش) انجام گرفت؛ به‌گونه‌ای که در این مرحله مقادیر S R و Q در سه گروه برای هر گزینه تعیین و مشخص شد. درنهایت گزینه‌های که در هر سـه گـروه مناسـب شناخته شد، با عنوان گزینه برتر انتخاب شد (جدول ۷).

جدول ۷ رتبه‌بندی مقادیر Q، R و S بر ای زیر حوضه‌های مطالعاتی طالقان رود

منطقه (زیر حوضه)	S	رتبه	R	رتبه	Q	رتبه
حسنجان	۰/418	٤	۰/284	۲	۰/۵۰۷	٤
شهرک	۰/379	۵	۰/218	۵	۰/731	۵
ناویزک	۰/376	٦	۰/114	٦	1	٦
دونبولید	۰/580	۳	۰/281	٤	۰/۱۸۹	۳
زیدشت۱	۰/735	۱	۰/281	۳	۰/074	۲
زیدشت۲	۰/711	۲	۰/310	۱	۰/033	۱

رتبه‌بندی گزینه‌ها بر اساس مقادیر Q

پس از تعیین رتبهٔ Q و دسته‌بندی مقادیر R و S برای تهیهٔ نقشهٔ حساسیت پذیری زیر حوضه‌های مطالعاتی به زمین‌لغزش بر پایهٔ مقادیر شاخص بهینه‌سازی ویکور (Q)، مناطق در سه کلاس کیفی حساسیت پذیری کم، متوسط و حساسیت پذیری زیاد طبقه‌بندی شدند (جدول ۸). درنهایت بر اساس طبقات حساسیت و مقادیر کمّی Q، نقشهٔ حساسیت پذیری منطقهٔ مطالعاتی به زمین‌لغزش در محیط GIS تهیه شد (شکل ۵).

جدول ۸ کلاس‌بندی کمّی و کیفی درجه حساسیت پذیری زمین‌لغزش

درجه حساسیت پذیری	کلاس (طبقه)	مقدار کمی ویکور (Q)
کم	I	> ۰/٦
متوسط	II	۰/٦ – ۰/۲
زیاد	III	<۰/۲

٤-۱. یافته‌های پژوهش

از بین نُه عامل مؤثر در حساسیت پذیری حوضه به لغزش، هفت معیار (شیب، طبقات ارتفاعی، تراکم زهکشی، کاربری اراضی، بارش، نوع خاک و لیتولوژی) دارای اثر فزاینده و دو معیار (فاصله از گسل و پوشش گیاهی) دارای اثر کاهنده در استعداد حوضه به زمین‌لغزش هستند. پس از محاسبهٔ مجموع اوزان معیارها با اثر افزایشی برای هر زیر حوضهٔ مطالعاتی، مشخص شد که زیر حوضه‌های زیدشت ۱، ۲ و دونبولید بیشترین مقدار و زیر حوضه‌های شهرک، ناویزک و حسنجان دارای کمترین مقدار هستند؛ به‌عبارت‌دیگر زیر حوضه‌های زیدشت ۱، ۲ و دونبولید از بیشترین حساسیت پذیری به وقوع زمین‌لغزش برخوردارند. حساسیت به وقوع زمین‌لغزش در زیر حوضه‌های شهرک، ناویزک و حسنجان حداقل است.

نتایج بررسی گروه‌بندی شاخص ویکور (Q)، سودمندی (S) و پشیمانی (R) نشان داد که زیرحوضهٔ زیدشت ۲ در حوضهٔ آبریز مطالعاتی، دارای بالاترین درجهٔ حساسیت نسبت به وقوع زمین‌لغزش است. مطالعهٔ نقشه‌های

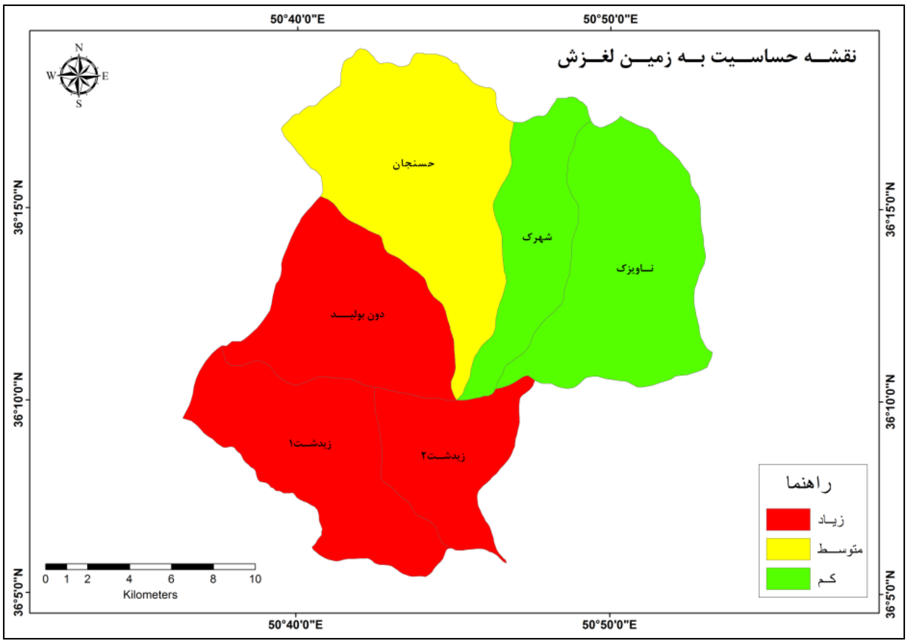
معیارهای مؤثر در وقوع زمین‌لغزش این حوضه نشان می‌دهد که نزدیکی به گسل و تـراکم بـالای زهکشـی، زمینـهٔ استعداد حوضهٔ زیدشت ۲ را نسبت به زمین‌لغزش فراهم کرده اسـت. همچنـین پـس از حوضـهٔ زیدشـت ۲، زیـر حوضه‌های زیدشت ۱ و دون بولید، به ترتیب بـا مقـادیر شـاخص ویکـور Q =۰/۰۷٤ و Q =۰/۱۸۹، از اسـتعداد زیاد یا درجه حساسیت پذیری بالا نسبت به وقوع زمین‌لغزش برخوردارند. همان‌طـور کـه نمـودار تغییـرات کمّـی شاخص ویکور (Q) در شکل ۵ نشان می‌دهد، توان و استعداد یا به بیانی، حساسـیت حوضـه بـه زمـین‌لغـزش بـا افزایش میزان Q کاهش می‌یابد. با این وصف، همان‌طور که در روند افزایشـی شـاخص ویکـور مشـخص اسـت، حوضهٔ ناویزک با حداکثر شاخص بهینه‌سازی (Q) و حـداکثر فاصـله از مقـدار ایـده‌آل، دارای پـایین‌تـرین درجـه حساسیت یا استعداد نسبت به وقوع زمین‌لغزش است. بررسی نقشه‌های تهیه شدهٔ عوامل ارزیابی، مشخص می‌کنـد که علت این امر به وضعیت خاک و نوع لیتولوژی این حوضه برمی‌گردد که زمینهٔ بروز زمین‌لغـزش را کـاهش داده است.

مطالعات انجام شدهٔ میدانی نشان داد که طبقات شیب ۵ تا ۱۵ و ۱۵ تا ۳۰ درجه، شیب‌های بحرانی بـرای وقـوع زمین‌لغزش‌ها و افزایش درجه حساسیت حوضه هستند. در حوضـهٔ نـاویزک، تنهـا حـدود ۱۰ درصـد از مسـاحت حوضه در شیب‌های ۱۵ تا ۳۰ درجه قرار دارد، درحالی‌که در حوضهٔ زیدشت ۱ و ۲، بیش از ۳۵ درصـد مسـاحت حوضه درشیب‌های ۵ تا ۱۵ و ۲۰ درصد در شیب‌های ۱۵ تا ۳۰ درجه واقع شده است. بـه گفتـه‌ای در حـدود ۵۵ درصد حوضه را محدودهٔ شیب‌های بحرانی تشکیل می‌دهـد و ایـن امـر، یکـی از عوامـل اصـلی در حساسـیت و استعداد بالای این حوضه در مقابل حساسیت پذیری پایین حوضهٔ ناویزک است. نتایج این یافته‌ها بـا نتـایج بهنیـافر و همکاران (۱۳۸۸) و سپهر و همکاران (۱۳۹۲) همخوانی دارد.

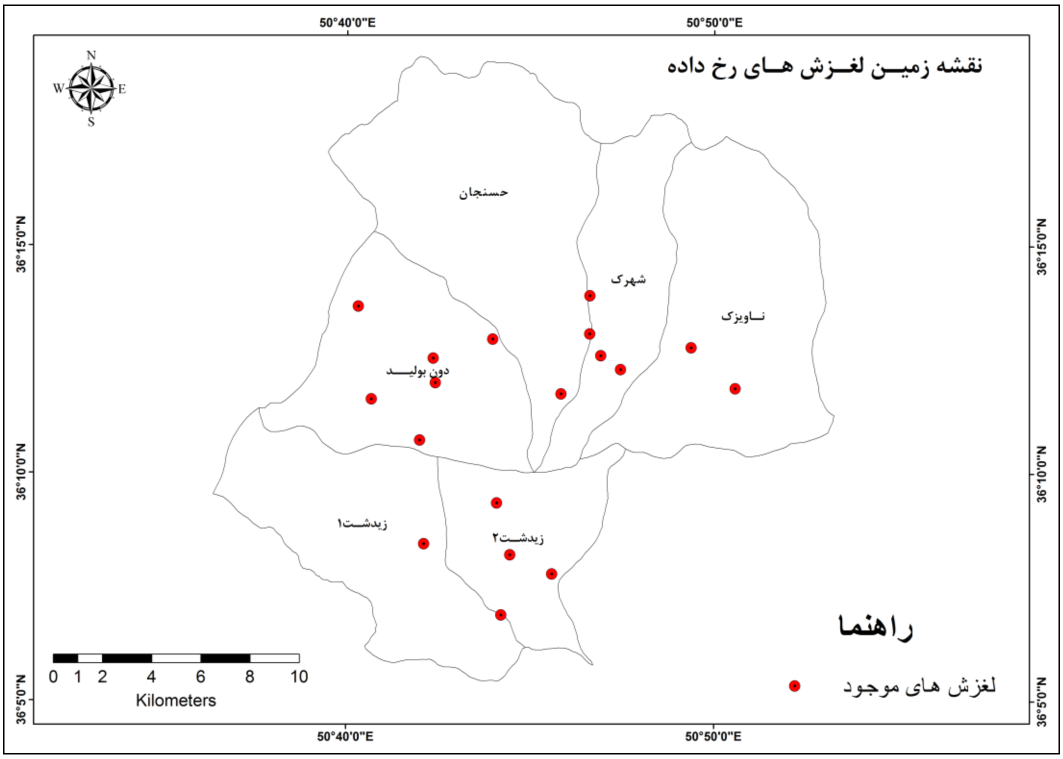
با توجه به نقشهٔ حساسیت پذیری زیر حوضه‌های طالقان رود (شکل ٦) کمتر از ٤٠ درصد از مساحت حوضـهٔ مطالعاتی را زیر حوضه‌هایی با حساسیت پذیری پایین یا استعداد کم نسبت به وقوع زمین‌لغزش تشـکیل مـی‌دهنـد، آنچه به شرایط توپوگرافی مناسب، پوشش گیاهی و شرایط هیدروژئومورفیک این مناطق در بالا بردن توان این زیـر حوضه‌ها در برابر زمین‌لغزش مربوط می‌شود. در مقابل حدود ٦٠ درصد از مساحت حوضه را زیر حوضه‌هـایی بـا شرایط حساس پذیری بالا و متوسط نسبت به وقوع زمین‌لغزش احاطه کرده‌اند. زیر حوضه‌هایی چـون زیدشـت ۱، ۲ و دونبولید با داشتن استعداد بالا در زمـین‌لغـزش، ازآنجاکـه منـاطق مسـکونی و روسـتایی را در دل خـود جـای داده‌اند، به مدیریت و توجه بیشتری در مدیریت بحران و ریسک زمین‌لغزش نیاز دارند. متأسـفانه، تغییـرات شـدید کاربری اراضی و نابودی پوشش گیاهی در سال‌هـای اخیـر کـه بـه دنبـال توسـعهٔ منـاطق گردشـگری و تفرجگـاه شخصی ایجاد شده است، این حوضه‌ها را به کانون‌های بحرانی زمـین‌لغـزش درحوضـهٔ طالقـان رود تبـدیل کـرده است. حفظ پوشش گیاهی، جلوگیری از تغییرات کاربری اراضـی، روش‌هـای بازسـازی و افـزایش تـوان رطـوبتی خاک و تثبیت شیب در دامنه‌های حساسیت‌پذیر حوضهٔ مطالعاتی توصیه می‌شود.

۵. نتیجه‌گیری

زمین‌لغزش‌ها به‌طور ساده از عملکرد نیروی گرانش زمین بر دامنه‌ها ناشی می‌شوند و تا زمانی که مقاومت توده سنگ یا خاک مساوی یا بزرگ‌تر از نیروی گرانش باشد، نیروها در حال تعادل هستند و حرکتی رخ نمی‌دهد. به دیگر سخن، زمین‌لغزش را می‌توان نمود تغییر تعادلی سطوح شیب دار، به دنبال اغتشاشات محیطی وارد بر ژئوسیستم تلقی کرد. پایداری و حفظ شرایط تعادلی در برابر این نیروی وارده، به اکولوژی و ساختار هیدروژئومرفولوژیکی سطوح بر می‌گردد. این پژوهش جز موارد اولیه‌ای است که در آن از روش بهینه‌سازی توافقی ویکور، برای بررسی و تهیهٔ نقشهٔ حساسیت پذیری مناطق به زمین‌لغزش استفاده شد. پس از بررسی‌های میدانی و انتخاب معیارهای مؤثر در حساسیت دامنه‌ها به زمین‌لغزش، الگوریتم ویکور برای بررسی درجهٔ حساسیت پذیری مناطق به زمین‌لغزش انجام و مشخص شد که زیر حوضهٔ زیدشت ۲ درحوضهٔ آبریز مطالعاتی، دارای بالاترین درجه حساسیت نسبت به وقوع زمین‌لغزش است. همچنین حوضهٔ ناویزک با حداکثر شاخص بهینه‌سازی (Q) و حداکثر فاصله از مقدار ایده آل، دارای پایین‌ترین درجهٔ حساسیت یا استعداد نسبت به وقوع زمین‌لغزش است. بررسی نقشهٔ حساسیت‌پذیری حوضه طالقان رود به زمین‌لغزش و بازدیدهای میدانی، مؤید کارایی مناسب الگوریتم ویکور در رتبه‌بندی و درجهٔ استعداد حوضه‌ها به زمین‌لغزش بود. با نگاهی به شکل ٦ مشاهده می‌شود که بیش ٦٧ ٪ لغزش‌های رخ داده (پایگاه داده‌های علوم زمین، ۱۳۹۳) با محدوده ریسک زیاد حاصل از این پژوهش، تطابق دارد. نتایج این پژوهش و روش پیشنهادی استفاده شده، می‌تواند در مطالعات بعدی راهگشا و مورد ارزیابی و مقایسه با سایر روش‌های برآورد حساسیت زمین‌لغزش قرار گیرد.



شکل ۵ نقشه حساسیت به زمین‌لغزش در حوضه آبخیز طالقان‌رود



شکل ٦ نقشهٔ مهم‌ترین زمین‌لغزش‌های رخ داده در حوضه آبخیز طالقان‌رود

کتابنامه

بهنیانفر، الف؛ قنبرزاده، ه؛ منصوری دانشور، م. ر؛ ۱۳۸۸. پهنه‌بندی خطر زمین‌لغـزش و ناپایـداری دامنـه‌ای به روش‌های AHP و احتمال در حوضهٔ آبریز رودخانه کنگ، دامنه‌های شـمالی بینـالود. مجلـهٔ علمـی پژوهشی فضای جغرافیایی. سال نهم. شماره ۲۷. صص. ۷۸ – ۵۵.

بیاتی خطیبی، م؛ ۱۳۸٦. تعیین حساسیت بالقوهٔ سطوح شیبدار در حوضه‌های کوهسـتانی نسـبت بـه وقـوع زمین‌لغزش‌ها با استفاده از روش تعیین عامل ویژه، مطالعهٔ موردی: حوضـه قرنقوچـای واقـع در دامنـه شرقی کوهستان سهند. فصلنامهٔ مدرس علوم انسانی. سال یازدهم. شماره ٤. صص. ۵۵ – ۲۹.

زارع، م؛ احمدی، ح؛ غلامی، ش؛ ۱۳۹۰. پهنه‌بندی و ارزیابی خطر زمین‌لغزش با استفاده از مدل‌های عامـل اطمینان، ارزش اطلاعات و تحلیل سلسله مراتبی در حوضهٔ آبخیز واز. مجلهٔ علمـی پژوهشـی علـوم و مهندسی آبخیزداری ایران. سال پنجم. شماره ۱۷. صص. ۲۲ – ۱۵.

فتوحی، ص؛ کیایی، س؛ ۱۳۹۳. مدیریت بحران و ارزیابی ریسک شهر قاین بـر اسـاس مـدیریت ریسـک. فصل‌نامه برنامه‌ریزی محیطی. سال چهارم. شماره ۱٤. صص ۱۰۳–۱۲۰

سپهر، ع؛ بهنیافر، ا؛ محمدیان، ع؛ عبدالهی، ا؛ ۱۳۹۲. تهیه نقشه حساسیت پذیری زمین لغزش دامنه‌های شمالی بینالود بر پایه الگوریتم بهینه‌سازی توافقی ویکور. مجله پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی. سال دوم. شماره ۱. صص۱۹-۳۶

محمدی، م؛ مرادی، ح. ر؛ فیض نیا، س؛ پورقاسمی، ح. ر؛ ۱۳۸۸. اولویت‌بندی عوامل مؤثر بر زمین‌لغزش و تهیۀ نقشۀ خطر آن با استفاده از مدل‌های ارزش اطلاعاتی و فرایند تحلیل سلسله مراتبی (مطالعۀ موردی: حوضۀ آبخیز هراز). مجلۀ علوم زمین. سال نوزدهم. شماره ۷٤. صص. ۳۲- ۲۷.

موسوی خطیر، س. ز؛ کاویان، ع. الف؛ سلیمانی، ک؛ ۱۳۸۹. تهیۀ نقشۀ حساسیت به وقوع زمین‌لغزش درحوضۀ آبخیز سجارود با استفاده از رگرسیون لجستیک. مجلۀ علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی. علوم آب وخاک. سال چهاردهم. شماره ۵۳. صص. ۱۱۱ – ۹۹.

Akgun, A. (2012). A comparison of landslide susceptibility maps produced by logistic regression, multi-criteria decision, and likelihood ratio methods: A case study atİzmir, Turkey. *Landslide*, *9*(1), 93-106.

Ayalew, L., Yamagishi, H., Marui, H., & Kano, T. (2005). Landslides in Sado Island of Japan: Part II. GIS-based susceptibility mapping with comparisons of results from two methods and verifications. *Engineering Geology*, *81*(4), 432-445.

Davalillo, J.G., Herrera, G., Notti, D., Strozzi, T., & Álvarez-Fernández, I. (2012). DinSAR analysis of ALOS PALSAR images for the assessment of very slow landslides: The Tena Valley case study. *Landslid*e, *11*(2), 225-246.

Diop, S., Forbes, C., & Chiliza, G.S. (2010). Landslide inventorization and susceptibility mapping in South Africa. *Landslide*, *7*(2), 207-210.

Felicísimo, A., Cuartero, A., Remondo, J., & Quirós, E. (2013). Mapping landslide susceptibility with logistic regression, multiple adaptive regression splines, classification and regression trees, and maximum entropy methods: A Comparative study. *Journal of Landslide*, *10*(2), 175-189.

Kavzoglu, T., Kutlug Sahin, E., & Colkesen, E. (2013). Landslide susceptibility mapping using GIS-based multi-criteria decision analysis, support vector machines, and logistic regression. *Landslide*, *11*(3), 425-439. DOI 10.1007/S10346-013-0391-7.

Komac, M. (2006). A landslide susceptibility model using the analytical hierarchy process method and multivariate statistics in Perialpine, Slovenia. *Geomorphology*, *74*(1-4), 17-28.

Lee, E.M., & Jones, D.K.C. (2004). *Landslide risk assessment*. London: Thomas Telford.

Pellicani, R., Van Westen, C.J., & Spilotro, G. (2013). Assessing landslide exposure in areas with limited landslide information. *Landslid*e, *11*(3), 463-480.

Regmi, N.R., Giardino, J.R., Mcdonald, E.V., & Vitek, J.D. (2012). A comparison of logistic regression-based models of susceptibility to landslides in Western Colorado, USA. *Landslid*e, *11*(2), 247-262.